

**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук, **Н.Д. КОВАЛЕНКО**, докт. техн. наук,  
**Г.А. СТРЕЛЬНИКОВ**, докт. техн. наук, **М.Т. ГУПАЛО**,  
ИТМ НАН и НКА Украины, г. Днепропетровск

## **ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОСТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

Досліджено вплив підігріву енергоносія на характеристики продуктів газоструминного подрібнення та акустоемісійні параметри процесу

Effect of power supply preheating on performances of gas jet grinding materials and acoustical emission factors of process is investigated

Анализ тенденции развития технологических процессов газоструйного измельчения и последующей переработки различных материалов показал перспективность работ в направлении увеличения температуры рабочего энергоносителя [1].

В технологическом процессе газоструйного измельчения соблюдается узкий диапазон требуемых фракций, регулируется уровень дисперсности, форма частиц, достигаются улучшенные физико-химические и технологические свойства порошков за счет использования особых режимов обработки частиц высокоскоростной деформацией, давлением (сотни МПа) и высокой температурой. Анализ результатов исследования процесса газоструйного измельчения показывает, что применение горячего воздуха в качестве энергоносителя газоструйного измельчителя позволяет: увеличить скорость истечения несущего измельчаемый продукт рабочего тела из сопел инжектора; повысить степень раскрытия (разделение по минералам) некоторых видов рудной фазы; совместить термообработку и сушку с процессом измельчения.

Целью данной работы является анализ влияния подогрева энергоносителя на технологические параметры, акустические характеристики процесса газоструйного измельчения и свойства получаемых продуктов измельчения.

Технология газоструйной обработки даёт высокие эффекты раскрытия минералов и механоактивации для особо твёрдых материалов (алмазы синтетические, корунд, карбид кремния) и трудно раскрываемых руд ввиду положительного действия температурного фактора, для которых температура

рабочего тела предпочтительна в пределах 673 – 873 К. В частности, это крайне важно при переработке минерального сырья, требующего длительной термопарообработки перед выщелачиваем при температуре 773 К. Например, из упорных сульфидных продуктов ряда месторождения Узбекистана извлечение золота и серебра возможно только после их обжига. Измельчение с подогревом позволяет исключить обжиг [2].

В экономическом и технологическом аспектах целесообразно использовать газоструйную обработку для повышения реакционной способности сульфидного молибдена. Повышенный энергетический потенциал поверхности измельчённых частиц способствует интенсификации последующего содового выщелачивания, что проверено в условиях Тырныаузского вольфрам-молибденового комбината. Высокая температура газового агента (от 673 до 773 К) позволила перевести сульфидный молибден в окисленную растворимую форму и удалить с поверхности реагенты от предыдущей операции флотации, что исключает пенообразование и улучшает показатели последующего гидрометаллургического передела молибден шеелитовых концентратов. За счёт высокотемпературной газоструйной обработки извлечение общего молибдена повышается на 4 % по сравнению с необработанным сырьём, а сульфидного молибдена – от 40 до 50 % [2].

Отмечены положительные эффекты газоструйной термомеханоактивации сульфидных концентратов никеля Норильского горно-металлургического комбината (НГМК) при температуре 573 К. В частности, при этом происходило ускорение автоклавно-окислительного выщелачивания в полтора – два раза и частичное обессеривание концентратов в процессе измельчения. Изменение степени раскрытия рудной фазы в тонких классах зависит от температуры несущего рабочего тела. В частности, показано, что в интервал температуры газа 673 ÷ 723 К является оптимальным в отношении избирательности раскрытия для окисленных железистых кварцитов Криворожского бассейна.

Вывод о большом влиянии температуры энергоносителя на скорость частиц подтвержден в условиях Верхнеднепровского горнометаллургического комбината (ВДГМК) при измельчении концентрата на пароструйной установке типа 6СП, на которой температура несущего рабочего тела составляла 473 – 673 К, давление –  $(8 - 11) \cdot 10^5$  Па.

При нагревании материалов, содержащих набор минералов, различающихся реакцией на температуру, происходят различные химические реакции,

дегидратация, модификационные превращения минералов, что приводит к изменению физико-химических свойств измельченного продукта и, как следствие, приводит к изменению показателей их последующего технологического передела. Например, струйное измельчение циркониевого концентрата происходит более эффективно при температуре продуктов сгорания природного газа  $T_k \approx 673 - 873$  К, чем в случае пароструйного измельчения при  $T_k \leq 673 - 873$  К.

Таким образом, технологические возможности газоструйного измельчения, как показал анализ, более высокие при использовании горячего энергоносителя.

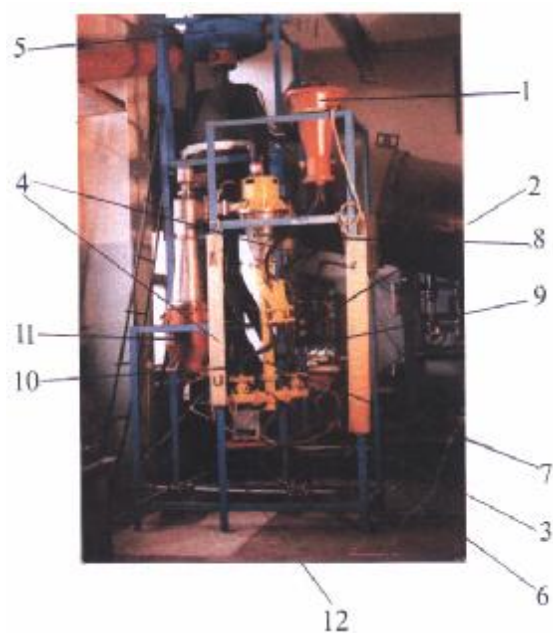
Известны различные способы подогрева энергоносителя газоструйного измельчителя:

- сжиганием топлива в камерах сгорания реактивных двигателей;
- сжиганием топлива в специальных горелках;
- посредством электронагрева рабочего тела.

Процессы газоструйного измельчения с подогревом несущего рабочего тела проводились на экспериментальной базе ИТМ на экспериментальной установке – газоструйном измельчителе УСИ-20 производительностью 20 кг/час (рис. 1).

Для подогрева рабочего тела на установке УСИ-20 была разработана и изготовлена система нагрева сжатого воздуха (рис.2), обладающая достоинствами электрических и горелочных подогревателей без недостатков, присущих им.

Основой такого подогревателя является двухконтурная схема, включающая подогрев воздушного контура (рабочего тела измельчителя) продуктами сгорания газогорелочного устройства. Первый контур пропускает чистый воздух высокого давления, не загрязняемый продуктами сгорания газогорелочного устройства. Первый контур – высокого давления, необходимого для инжектирования энергоносителя в камеру измельчителя, второй – низкого давления, характерного для газогорелочных устройств. Холодный воздух высокого давления (до 0,7 МПа) пропускается в межтрубном пространстве теплообменника, омывая трубопроводы, по которым пропускаются продукты сгорания газогорелочного устройства. Перед поступлением в теплообменник воздух из рабочей (подводящей) сети осушается в осушителе. Разработанный и изготовленный в ИТМ подогреватель рабочего тела может использоваться для измельчителей производительностью до 200 кг/час.



1 – бункер; 2 – трубы подачи исходного материала; 3 – каркас; 4 – манометры; 5 – вытяжное устройство; 6 – помольная камера; 7 – стояк; 8 – классификатор; 9, 10 – патрубки; 11 – бункер; 12 – расходомерный участок

Рис. 1. Экспериментальная установка УСИ-20

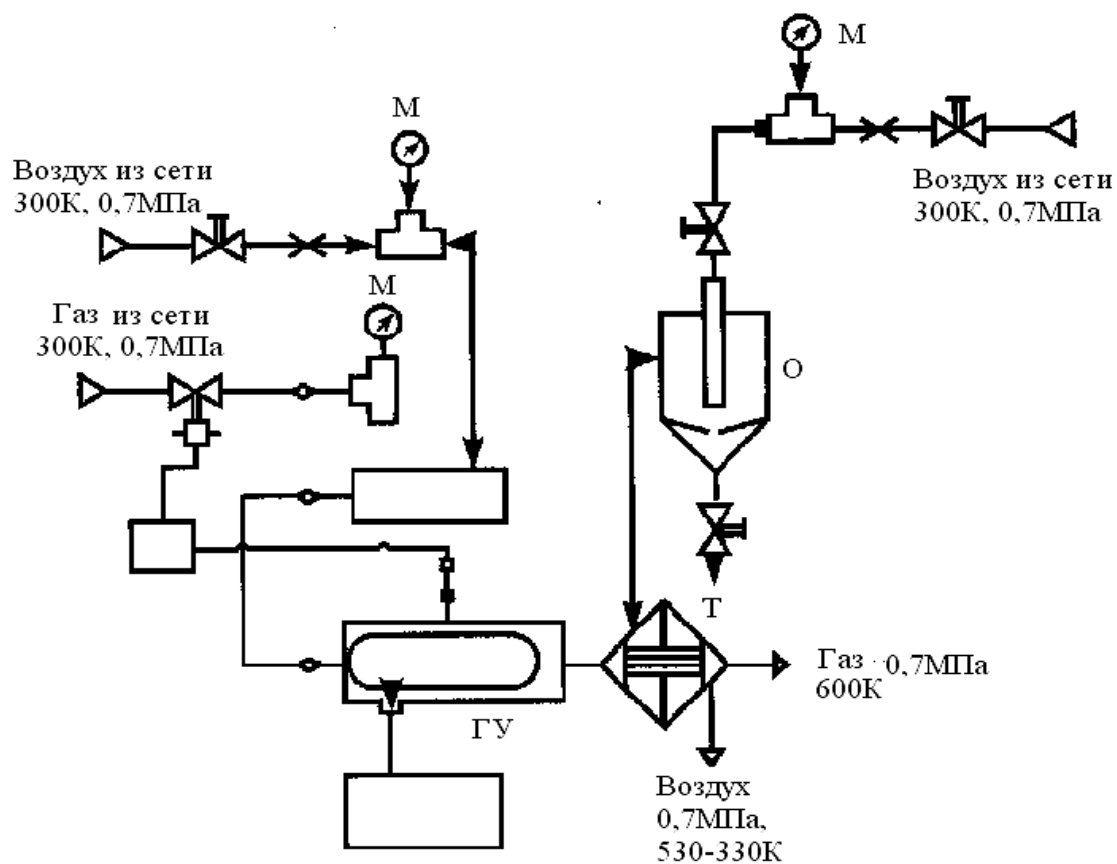


Рис. 2. Схема измельчительной установки с подогревом энергоносителя в теплообменнике

Параметры подогревателя: давление рабочего воздуха – до 0,8 МПа; давление природного газа – до 0,08 МПа; давление воздуха на выходе из теплообменника – до 0,7 МПа; максимальный расход природного газа – 6 м<sup>3</sup>/час. Исследование процессов в подогревателе энергоносителя газоструйного измельчителя показали его работоспособность на природном сжатом газе метане и сжиженном природном газе пропане. Максимальная температура на выходе подогревателя – 3700 К. При этом температура рабочего тела в помольной камере 1800К. Подогреватель обеспечивает широкий диапазон (400 К – 1800 К) температуры в помольной камере.

Исследования показали преимущества использования подогрева энергоносителя в теплообменнике, т.к. готовый продукт сверхтонкого измельчения получают без нежелательных посторонних примесей. На УСИ-20 проводились исследования процесса измельчения с нагревом энергоносителя различных материалов: шамота, шлака, карбида бора, технического мела, резиновой крошки.

В процессе измельчения резиновой крошки температура среды в зоне измельчения составляла от 353 до 393 К, а температура материала не превышала 333 – 353 К, при этом в системе измельчительной установки поддерживалось разрежение вытяжным вентилятором высокого давления, составляющее на выходе 0,4 – 0,5 МПа. Для достижения требуемой дисперсности измельченного продукта ( $d_q = 100 - 500$  мкм) частота классификатора поддерживалась на уровне  $n = 1000 - 2000$  мин<sup>-1</sup>. С изменением типоразмера установки частота  $n$  должна корректироваться. В ходе экспериментов установлено, что без нагрева энергоносителя измельчения резиновой крошки не происходит, а производительность установки связана с удельным расходом энергоносителя на единицу массы измельченного резинового порошка логарифмически линейной зависимостью.

Испытания струйного измельчения влажного дробленого мела Глазуновского месторождения (исходная крупность – менее 3 мм, медианный размер – 33 мк, исходная массовая влага ~ 10 %) проводились с целью определения рациональных режимов получения тонко дисперсного технического мела с одновременным его обезвоживанием в процессе измельчения в холодных или нагретых струях. Выбирались оптимальные режимы для достижения требуемого качества продукта и минимальной энергоемкости измельчения.

Оценка дисперсности исходного дробленого и измельченного струйного мела проводилась по величине медианного размера и удельной поверхности на

приборах «MALVERN» и " SediGraph". При испытаниях режимные параметры изменялись в следующих пределах: избыточное давление энергоносителя  $P = 0,2 - 0,3$  МПа; температура  $T = 303 - 473$ , частота вращения ротора классификатора  $n = 2000 - 3700 \text{ мин}^{-1}$ .

В ходе проведенных исследований были выбраны рациональные режимы струйного измельчения, обеспечивающие получение из дробленого влажного мела тонкодисперсного технического мела, соответствующего нормативным показателям дисперсности для марок мела: М-5, М-3, М-60, БЛ-50, РС (ЗАО "Руслайм"), ММС-2, ММОР, МТД-2, МПНБ-2 (АОЗТ "Шебекинский меловой завод"). Установлено, что при работе на холодном энергоносителе (температура 303 К) остаточная влага в продукте составляет 0,3 – 0,5 %, тогда как в среде нагретого энергоносителя (при температуре в зоне помола 373 – 473 К) остаточная влага в продукте практически отсутствует (0,1 – 0 %).

Установлено, что работа струйной мельницы с нагретым энергоносителем является более эффективным вариантом технологии измельчения, так как при прочих равных условиях ( $P = 0,25$  МПа,  $n = 2000 - 3000 \text{ мин}^{-1}$ ) производительность мельницы увеличивается в 4 раза по сравнению с вариантом без подогрева.

Результаты предварительных исследований показали, что повышения производительности струйных мельниц при использовании подогретого газа обусловлено тем, что в процессе измельчения и неоднократной циркуляции частиц в системе разгона, классификации и пневмотранспорта они претерпевают термоциклические воздействия энергоносителя (с температурой от 573 до 873 К). При этом за счёт смены деформации сжатия и растяжения увеличивается зона разупрочнения гетерогенного материала, что облегчает измельчение. Кроме того, осуществляется одновременное просушивание влажных материалов. Немаловажным является повышение скорости энергоносителя. Оценки показывают, что подогрев воздуха на 473К равнозначен приросту скорости на 30 % ( $W/W_0 \approx 1,3$ ;  $T_0 \approx 290\text{K}$ ).

Проведенные исследования по измельчению карбида бора и шамота подтвердили также вывод о связи подогрева энергоносителя и уменьшения крупности измельчаемого материала, улучшения его дисперсности. Так, увеличение температуры энергоносителя с 293 К до 473 К способствует изменению медианного размера частиц карбида бора с  $d_{50} = 10,87$  мкм до  $d_{50} = 12,19$  мкм, при этом были улучшены дисперсности конечного продукта:  $g_{45} = 99,7 - 99,8$  %,  $g_{10} = 88,4 - 90,8$  %. При измельчении шамота при неизменных  $P = 0,25$  МПа и

$n = 500 \text{ мин}^{-1}$  температура изменялась от 293 К до 350 К, 400 К и 450 К ( кривые 1 и 2 на рис. 3), а дисперсность улучшилась с  $g_{40} = 43,5 \%$  до  $g_{40} = 87,9$ .

Таблица

Условия измельчения и анализы дисперсности измельченного мела

Р, МПа	n, мин <sup>-1</sup>	Медианный размер, мкм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Примечание
		33,27	0,1007	Исходный мел Фракция -50 мкм
		25,37	0,1502	
0,25	3200	2,01	1,5445	Холодный воздух
0,25	3200	2,22	1,3790	Холодный воздух
0,25	3200	2,43	1,2511	Горячий воздух
0,25	3200	2,35	1,3260	Горячий воздух
0,25	3700	2,07	1,4906	Холодный воздух
0,25	3700	2,39	1,2804	Горячий воздух

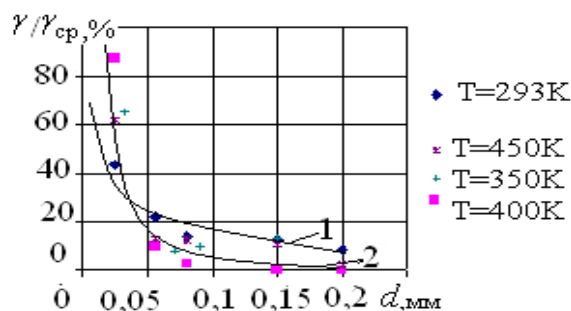


Рис. 3. Гранулометрический анализ струйного измельчения шамота при различных температурах энергоносителя на входе в помольную камеру

Исследование акустоэмиссионных характеристик процесса измельчения шамота, как и других материалов, проводились с помощью широкополосного датчика [3], передающего акустоэмиссионные сигналы (АС) на АЦП Е-220 и далее на компьютер. Запись и расшифровка АС проводились с помощью программы Power Graph 3.3 [4]. Частота регистрации сигналов выбиралась исходя из информативности результатов. Наиболее информативной оказалась частота  $w_3 = 400 \text{ имп/с}$ . Для каждой частоты записи  $w_3$  была определена резонансная частота  $w_r$ , на которой наблюдались всплески амплитуды  $A_r$  на всех режимах измельчения: загрузка, рабочий режим и разгрузка помольной камеры [5].

На рис. 4 показана кинетика изменения амплитудно-частотных характеристик АС, записанных для холодного (1) и горячего (2) энергоносителя при про-

чих равных технологических параметрах ( $P = 0,25$  МПа и  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>). При возрастании температуры энергоносителя на входе в помольную камеру с 298 К до 373 К на рабочем режиме измельчения максимальная амплитуда АС возрастала с  $A_{max}=3$ В до  $A_{max}=4,5$  В (рис. 4 а), при этом резонансная амплитуда  $A_r$  увеличивалась вдвое (рис. 4 б).

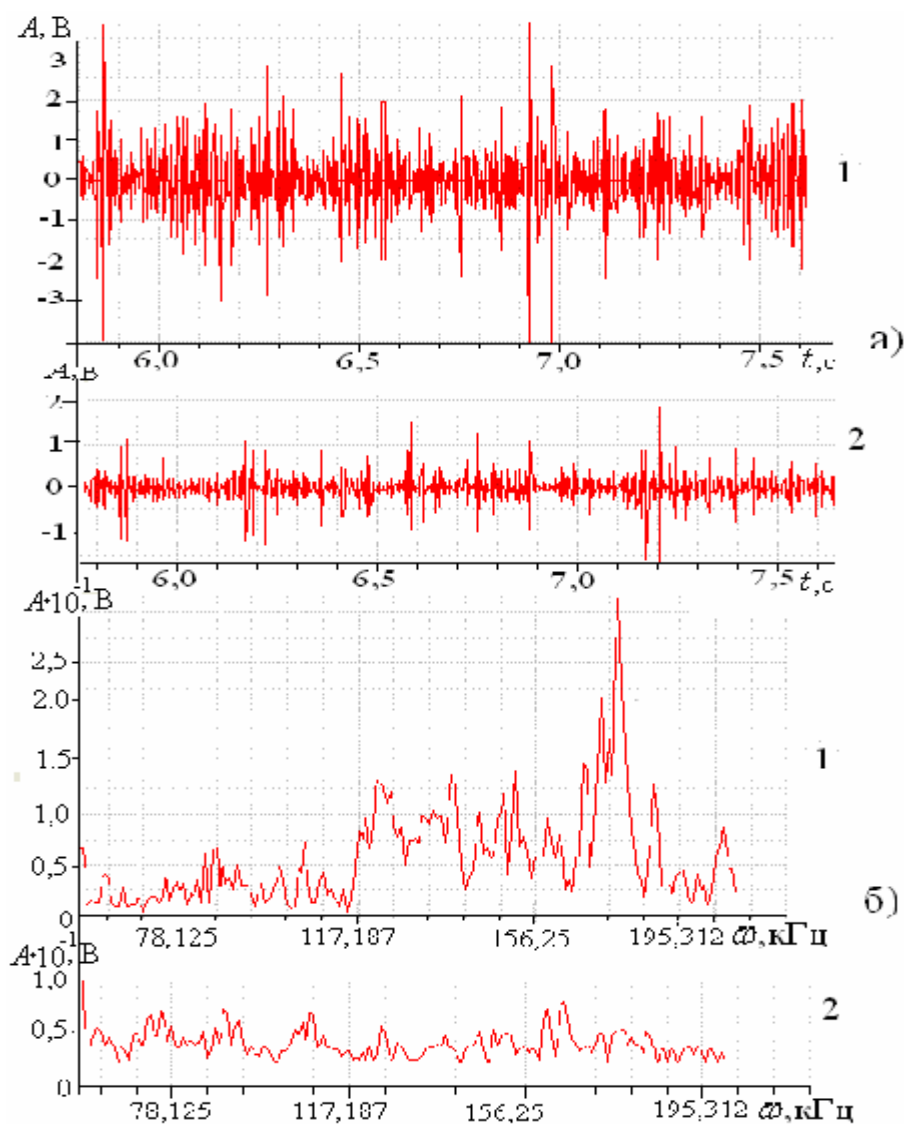


Рис. 4. Кинетика изменения амплитудно-частотных характеристик АС измельчения шамота без нагрева (1) и с нагревом (2) энергоносителя

Однако было установлено, что резонансная частота при нагреве энергоносителя не меняется. Это еще раз подтвердило то, что эта величина ( $\omega_r$ ) является характерной для процесса измельчения любых материалов при разных режимных параметрах, но при данной частоте записи и совместно с резонансной ам-



плитудой  $A_r$  может быть использована для управления процессом измельчения.

Проведенный анализ активности АС показал зависимость этой величины от температуры энергоносителя. При повышении температуры с  $t_g = 298$  К до  $t_g = 333$  К число АС за 1с возросла с  $N^* = 40,2 \cdot 10^3$  до  $N^* = 41,8 \cdot 10^3$  при  $P = 0,25$  МПа и  $n = 700$  мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, амплитудно-частотные и другие акустоэмиссионные параметры процесса измельчения зависят от температуры энергоносителя. В свою очередь эти параметры говорят о процессах, происходящих с измельчаемыми материалами, и несут определенную информацию о свойствах получаемого продукта измельчения [6].

**Выводы.** Проведенный анализ газоструйного измельчения различных материалов с подогревом энергоносителя позволяет сделать выводы:

1) технологические процессы переработки некоторых материалов (например, золотосодержащие руды, резина) требуют их газоструйного измельчения с подогревом энергоносителя, при этом газоструйная механоактивация повышает эффективность раскрытия особо твердых материалов и трудно раскрываемых руд;

2) подогрев энергоносителя позволяет увеличить скорость струй, несущих измельчаемый материал, и совместить процесс измельчения материала с его термообработкой и сушкой;

4) повышение температуры энергоносителя позволяет улучшить дисперсность и добиться необходимой крупности материала при меньшем давлении;

5) установлена зависимость акустоэмиссионных параметров от температуры воздуха перед истечением в помольную камеру, в частности, повышение амплитуды ( $A_{max}$ ,  $A_r$ ), активности АС и сохранение величины резонансной частоты  $w_r$ ;

6) использование горячего энергоносителя при прочих равных технологических параметрах повышает производительность процесса измельчения.

**Работа выполнялась при активном участии проф. НГУ докт. техн. наук, Л.Ж. Горобец.**

**Список литературы:** 1. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук: НГУ: Днепр-ск. – 2004. – 35 с. 2. Пилов П.И.,

Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Выбор критической плотности энергии при тонком измельчении // Обогащение руд. – С.-Пб.: – 2007, – № 5. – С. 7 – 10. **3.** Аперидический датчик для регистрации акустических сигналов: А.с. 512602 СССР / В.Н. Бовенко, В.И. Полунин (СССР). – Оpubл. 30.08.76, Бюл. №16. – 2 с. **4.** Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 27. – С. 33 – 41. **5.** P.I. Pilov, L.J.Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles // Науковий вісник НГУ. – 2008, № 6. – С. 23 – 26. **6.** Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. О физических критерия разрушения и диспергирования // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 28. – С. 26 – 32.

Поступила в редколлегию 11.09.08

УДК 668.98

**М. ЦИАК**, канд. техн. наук, **С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук,  
Университет Варминского-Мазурский в Ольштыне, Польша

## КОМПРОМИССНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Побудовані та проаналізовані експериментально-статистичні моделі для оптимізації впливу модифікуючих добавок та параметрів зернового складу на показники якості бетонів, що самоуплотнюються.

Created and analyzed experimental-statistical models for optimization of modificative add-mixtures influence and granulometric composition parameters to quality index of self-compacting concrete.

**Введение.** Самоуплотняющийся бетон – *Self-Compacting Concrete* (SCC) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях [1]. Высокая эффективность SCC способствовала созданию рабочей группы RILEM (1996) для разработки рекомендаций по использованию SCC. В 2004 году организован технический комитет 205-DSC “Долговечность самоуплотняющегося бетона”. В результате исследований была разработана классификация самоуплотняющихся бетонов (*Specification and Guidelines for SCC*), определяющая их назначение и области применения.